地温のみによる温泉の可能性に就て

理學士 瀨 野 錦 藏

1. 緒 言

降雨によつて溫泉の湧出量が增加することは古くより諸外國に於ても認められ，我邦に於ては別府溫泉その他多くの溫泉に於ても亦認められてゐる。されば溫泉源の問題については古くは循環水が地中深く入つて加熱昇溫し，再び地表に湧出したものであるとの學說が盛んであつた。然し Juess の處女水說の提唱以來，溫泉の熱は地下マグマの發散する處女物質が少くとも一部混入することによつて得らるゝものが多いとされ，普通の地溫のみで溫まる溫泉は殆んどないとする學者さへ現はれた。別府の明礬溫泉附近は地溫が甚だ高く，地下1米に於て流るゝ溫泉水の溫度は地溫よりも低い。而して此の邊は各所に高熱水蒸汽その他の瓦斯が噴出してゐるから，此の溫泉は必ずしも地熱のみによつて溫泉成生を見たものとは言へないかも知れぬ。然しある地點に於てガスの發散などが見えずに地中溫度が異常に高い上に溫泉水脈は全くないといふ場合，地上より冷水を注入し再び之を取出せば地溫の加熱のみによる高溫水が得られはしないかといふ事は屢々考へられて來たところであるので，この點につき少しく考慮して見たいと思ふ。

2. 加熱の法則

地中に導水管を埋沒し之に冷水を注入するときは高溫深層に到れば地溫により加熱され昇溫するのは當然の事であるが，絕えず冷水を注入すれば周圍の地溫は益々低下し來りはせぬかといふ虞れがある。然るに別府に於ける溫泉について測定したるに[1]深處の高溫水が絕えず上昇し冷却を受けてゐて，然も地溫は一方的に上昇してゐないところを見れば，逆に冷水が加熱され昇溫しても定常狀態にあり得ると考へられる。然らばその時の加熱の法則は如何といふに，これは高溫水の冷却の法則が知られてゐるからその逆に符號を變へれば加熱の法則になり得る譯である。高溫水が低溫地層を貫いて上昇するときの冷却の狀況は數學的に嚴密に岡本氏[2]に解かれ，その近似解を筆者[3]は求めた。今數學的に嚴密に進んでゆくことは手數がかゝるので近似解の方法で考慮して行かうと思ふ。

さて高温水が低温地層を流るゝ時の冷却の法則は(4)

$$\frac{dT}{dz}=\gamma(T-\theta) \qquad (1)$$

こゝに T は水温，θ は地温，γ は常數 z は深さで下方に正號を取る。もし $\theta>T$ ならば水温は加熱される。然も湧出量が可なりの時には高温水が低温層を通過して來てもその深さ深さの地温にならなかつた様に，冷水が高温層を通過しても地温に等しく迄はならぬ。故に導水管の下端に達してもその深さの地温よりは低い。從つてこれを再び汲上げる途中に於ても尙加熱される譯になる。而して水温と地温と等しい深さより淺くまで上昇して冷却され初める事になる。冷水を地表温に等しい温度とすればこの熱の授受關係の反對になる轉移深度は如何に淺くとも地表にはならぬ。冷水が加熱されゝば少くとも地表温よりは高くなつてゐるからである。

下降水管と上昇水管とが接近してゐればお互に影響し合つて加熱冷却の法則は複雜であるから先づ簡單に影響しないだけ離れてゐるものと考へる。

以上の如く考へると，冷水を注入して再び地表に現はれる迄を次の三過程に分けると簡單になる。(1)は下降過程で下端に到るまで常に加熱される。(2)は上昇加熱過程で下端から地温と水温とが等しいところまでは上昇し乍ら加熱される。(3)は上昇冷却過程で，地温と水温とが等しいところから地表までは冷却される。以上の三過程に就いて考へる。

(1) 下降過程. この間では水温は常に地温より低いから次の式が成立する。(水の比熱と密度の積は 1 に考へる。)

$$\frac{dT}{dz}==\gamma(\theta-T) \qquad (2)$$

この一般解は

$$T=Ae^{-\gamma z}+e^{-\gamma z}\int\gamma,\ \theta,\ e^{+\gamma z}dz \qquad (3)$$

もし地温分布狀態が最も簡單に深さに比例するとすれば $\theta=\alpha+\beta z$〔α,β 常數〕とおき，且冷水は地表にて地温に等しいとすれば

$$T=\alpha+\beta z-\frac{\beta}{\gamma}(1-e^{-\gamma z}) \qquad (4)$$

(2) 上昇加熱過程. この過程に於ては水は上昇しつゝ且加熱されて昇温するから，

$$-\frac{dT}{dz}=\gamma(\theta-T) \qquad (5)$$

が成立し下端 $z=z_0$ の水温は(4.)式より得らるゝから

$$T=\alpha+\beta z-\frac{\beta}{\gamma}\{e-\gamma(z_0-z)(2-e^{-\gamma z})-1\} \qquad (6)$$

而して水温 T が地温 $\theta=\alpha+\beta z$ と等しくなつて熱の授受關係が反對になる深さ z_1 は T=

$\alpha+\beta z$ を(6.)式に代入して得られる。

$$z_1=z_0-\frac{\log_e(2-e^{-\gamma z_0})}{\gamma} \tag{7}$$

(3) 上昇冷却過程. $z=z_1$ 以淺はこれまで加熱せられた水が冷却される。且 $z=z_1$ では地温と水温とが等しいから既に紹介した温泉水の湧出の場合に全く同じく[(5)]

$$\frac{dT}{dz}=\gamma(T-\theta) \tag{8}$$

が成立しその解は次の如くなる

$$T=\alpha+\beta z+\frac{\beta}{\gamma}\{1-e^{-\gamma(z_1-z)}\} \tag{9}$$

以上は下降水導管と上昇水導管とが互に熱的關係が影響し合はぬ場合を考へたが，若し實際に工事を行ふとすれば恐らく二導管を平行接觸せしめるか，二重管にして內外の二通路を作らなければならぬ。二導管を平行接觸せしめた場合は複雜で近似解では進めないが，二重管の場合は比較的簡單に考へられる。

例へば今，二重管の內部に冷水が下降し，外部より上昇する場合を考へて見る。外部管の水温が地温に等しくなる深さを境界として上下二部に分けて考へ，下降水温を T'，外部上昇水温を T で示せば，內外管の熱の授受關係はニュートンの法則によりその温度差に比例すると考へてよいから既に述べた同一の式(1.)が成立することになりその常數を γ' とすれば，

上部：
$$\frac{dT}{dz}=\gamma(T-\theta)+\gamma'(T-T') \tag{10}$$
$$\frac{dT'}{dz}=\gamma'(T-T') \tag{11}$$

下部：
$$-\frac{dT}{dz}=\gamma(\theta-T)-\gamma'(T-T') \tag{12}$$
$$\frac{dT'}{dz}=\gamma'(T-T') \tag{13}$$

となつて上下部とも同一微分方程式が成立しその解は

$$T=Ae^{az}+Be^{bz}+\theta \tag{14}$$
$$T'=\frac{A}{\gamma'}e^{az}(\gamma+\gamma'-a)+\frac{B}{\gamma'}e^{bz}(\gamma+\gamma'-b)+\theta-\frac{\beta}{\gamma'} \tag{15}$$

こゝに $a,\ b,=\dfrac{\gamma\pm\sqrt{\gamma^2+4\gamma\gamma'}}{2}$

A, B は積分常數で下端 $z=z_0$ にて兩水温が等しとすれば

$$A=\beta\frac{-(\gamma-b)e^{bz_0}+(\gamma+\gamma'-b)}{(\gamma+\gamma'-b)(\gamma-a)e^{az_0}-(\gamma+\gamma'-a)(\gamma-b)e^{bz_0}},$$
$$B=\beta\frac{(\gamma-a)e^{az_0}-(\gamma+\gamma'-a)}{(\gamma+\gamma'-b)(\gamma-a)^{az_0}-(\gamma+\gamma'-a)(\gamma-b)e^{bz_0}}$$

となる。

3. 數 値 的 例

以上二つの例の内後者の方は實際の工事に於ける可能性が多い，然しγの値は實測値よりその程度を知られてゐるがγ'は實測されたる資料がない。γと餘り違つた値とは考へられぬが想像に過ぎぬ。それで數値計算をするには不充分であるから止むを得ず初め場合について實施することにしやう。

そこで常數の値に就いて採用すべき値として

$2\gamma=4.0$ cm（別府穿掘溫泉の導水管口徑に近い）

$\gamma=\dfrac{2\pi\gamma}{q}\lambda$, $\lambda=0.015\ \mathrm{cm}^{-1}$（別論文に紹介せる値の平均に近い値である。）

$q=$ 注入量乃至汲上湧出量$=5,\ 10,\ 15,\ 20\ L/M$（別府溫泉湧出量程度）

$\alpha=17$（別府地表溫）

$\beta=$地中增溫率$=\dfrac{1}{30}$ degree/m　（正常增溫率）

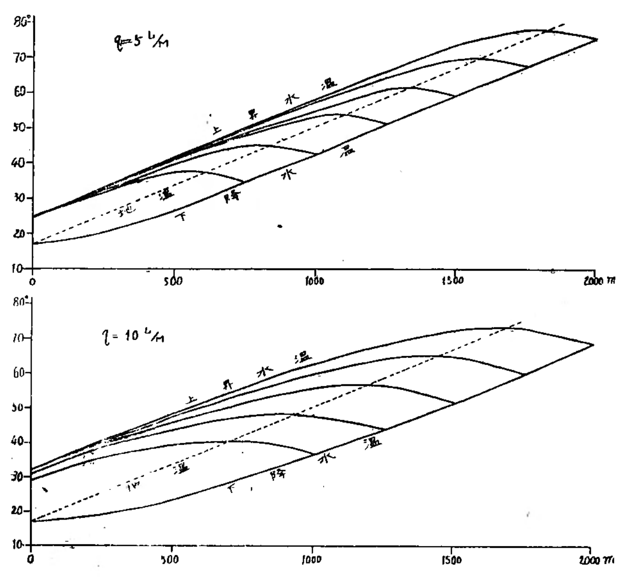
$=\dfrac{2}{10}$ degree/m　（別府溫泉分散型地帶の增溫率）

$=\dfrac{1}{1}$ degree/m　（別府田ノ湯溫泉脈の不連續層附近增溫率）

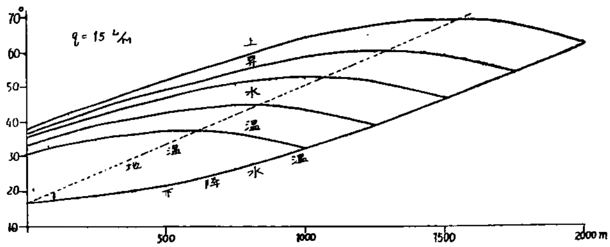
等の値を採用すれば第1,2,3圖の如くなる。

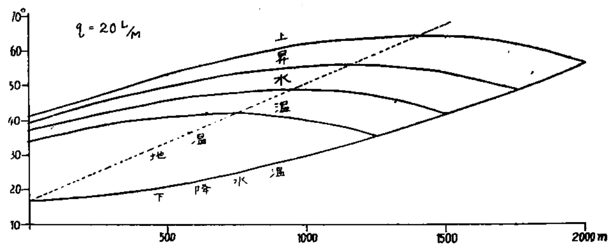
(I)　$\beta=\dfrac{1}{30}$ °C/m.　この場合に於ては正常の地溫增溫率であるが q が大になるに從ひ地

第1圖の1　增 溫 率 1/30 の 場 合

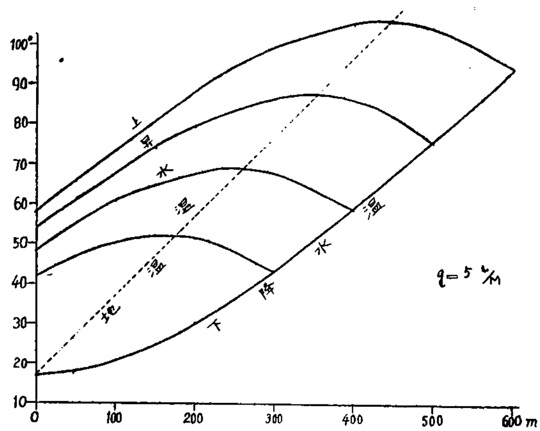


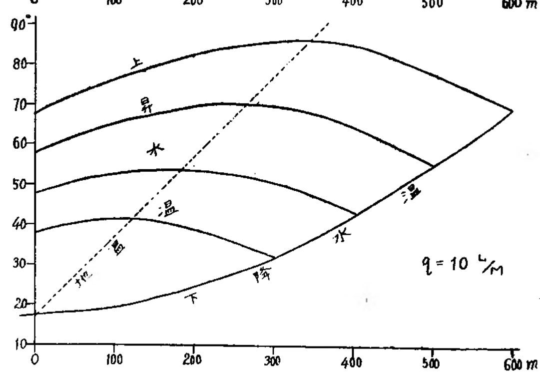
第1圖の2



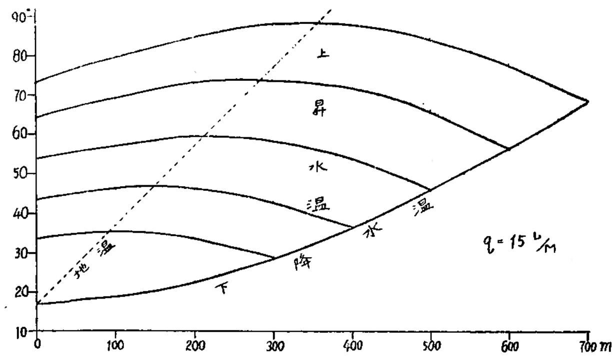


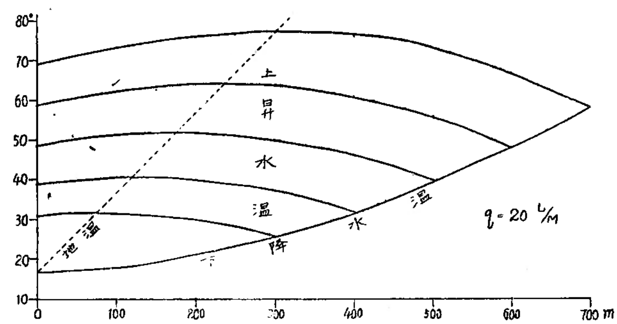
第2圖の1　増温率 1/10 の場合





第 2 圖 の 2



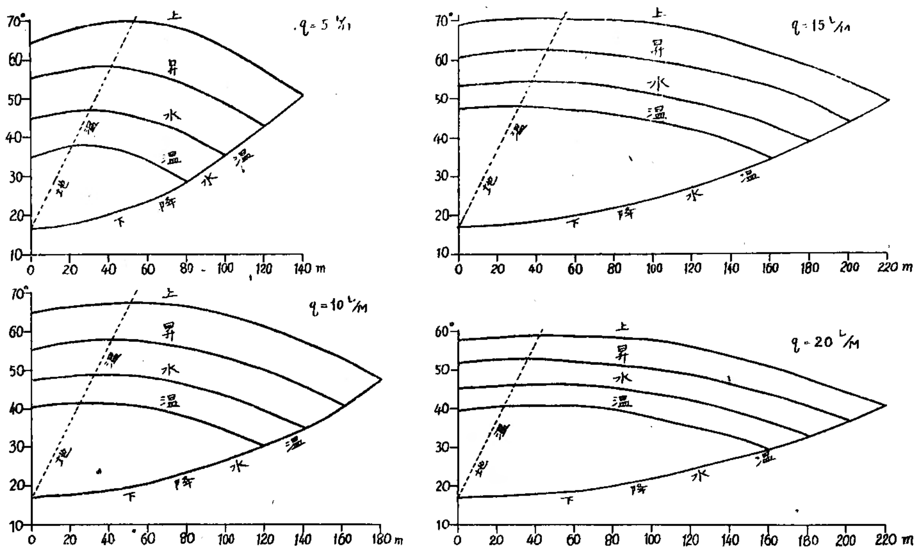


温と水温との差は大となる。何れの場合にも深く進むに從ひ水温は上昇するが汲上げに際し冷却も相當の程度であり，q=5 L/M 場合には深さ如何にかゝはらず地表に現はれたときの水温は殆んど等しい。然し地中を循環してきた結果はもとの水温よりは高いことは明かである。q の大きくなるに從ひ且つ深いほど地表に再び現はれたときの水温は高くなる。q=20 L/M に於て而も深さ 2 km を往復して初めて 40 ℃ を越す程度のものである。故にこの程度にて入浴に適する水温を得る事は先づ困難と見てよい。

(II) $\beta=\frac{2}{10}$ ℃/m. 増温率は可なり大であるが，別府温泉地域の値としては小の方である。別府温泉に於ける穿掘最大深度は 300 m 弱であるが，その程度の深さまで進んで汲上げられたのでは最高 42 ℃ 程度で温泉と稱する事は出來やうが入浴には不充分である。深度が 500 m 程度となれば入浴には充分であるが之は工事の問題にも關係する。且又かゝる程度の増温率を保持するのは反つて下層に温泉水がある爲ではないかと考へさせられる。

(III) $\beta=\frac{1}{1}$ °C/m，増温率は甚だ大で別府田ノ湯温泉脈に於ける不連續層の附近に於ける値で，この場合には淺い穿堀で高溫水を得ることが出來る。然しこれも(II)の場合と同じくかゝる増溫率を保持し得るの恐らく別府のみならず他所に於ても反つて下層に温泉水の存在を示す事であつてわざわざ冷水を注入するには及ばない。溫泉脈の伏在せず且かゝる大きい増溫率を有するのは噴出後間もない熔岩層以外では求められさうにない。

第3圖　増溫率 1/1 の場合



以上の如く考へ來るときには地溫のみによつて絶えず冷水から高溫水を得ることは實際的には先づ困難と見るべきではないかと思はれる。然しかく人工的には困難であつても自然には必ずしも困難とは言へぬ。滲透量が充分小さく岩層の裂罅より徐々に浸入した地下水ならばその深さの地溫に充分近い水溫となり得べく且これらが集合して再び上昇するならば高溫度の溫泉を得ることも出來やう。又上掲の諸例に於て汲上げた水溫は常に地溫より高い。溫泉の定義としてその土地の溫度より高溫の湧泉であるとするならば，これらはすべて溫泉を作り得た事になる。從つて逆に溫泉の内には地溫のみによつて溫められたものもあり得ると考へられる。

終りに校閲を賜つた恩師野滿隆治博士に深謝の意を表する。

參考文献

(1) 瀬野錦藏，西田久雄；別府溫泉二三の湧出口導管中に於ける泉溫分布と途中冷却率，本誌第2巻